

Approche multi-scalaire de la variabilité spatiale et temporelle d'un pic d'ozone le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009 dans la région parisienne

S. DUCHÉ¹, N. MARTIN², M. MADELIN¹

¹ CNRS UMR 8586 PRODIG, Equipe Dynamique des Milieux et Risques. Université Diderot - Paris 7, 5 rue Thomas Mann – 75205 PARIS CEDEX 13 (sarah.duche@univ-paris-diderot.fr; malika.madelin@univ-paris-diderot.fr)

² CNRS UMR 6012 ESPACE, Equipe Gestion et Valorisation de l'Environnement. Université de Nice Sophia, 98 bd Edouard Herriot – 06204 NICE CEDEX 3 (nicolas.martin@unice.fr)

Mots clés : mesures itinérantes, ozone, épisode de pollution, échelle spatiale fine et régionale

1. Introduction

L'ozone est actuellement un des polluants les plus problématiques en Ile de France [2]. En effet, les taux d'ozone moyens annuels ont augmenté de 89% de 1992 à 2008 et les seuils d'information et de recommandation fixés à 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (normes françaises) sont fréquemment dépassés chaque année. Ces pics de pollution affectent la santé de la population (problèmes respiratoires et cardio-vasculaires) [6]. Les situations anticycloniques avec un temps calme (peu ou pas de vent, faible nébulosité) [4] favorisent l'accumulation de l'ozone et sa variabilité spatiale, comme ce fut le cas du 30 juin au 2 juillet 2009, en Ile de France : faible insolation, vent calme ($< 3 \text{ m/s}$ en moyenne) et températures élevées (maxima $> 30^\circ\text{C}$ à Paris Montsouris sur les trois jours). Ces conditions ont entraîné des forts taux de pollution (en moyenne sur l'Ile de France, 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 30, 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 1^{er} et 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 2) avec plusieurs dépassements du seuil critique de 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Dans ce contexte et dans le cadre d'une recherche doctorale visant à évaluer l'exposition des touristes à la pollution de l'air en métropole parisienne, des mesures de concentration d'ozone ont été réalisées le 30 juin et le 1^{er} juillet 2009 sur deux sites touristiques : Champ de Mars - Tour Eiffel - Trocadéro et Champs Elysées - Jardin des Tuileries. Cette communication présente les résultats de cette campagne de mesure à une échelle fine et replace au préalable cet épisode de pic de pollution à l'échelle régionale, celle de l'Ile de France.

2. L'épisode de pollution du 30 juin au 2 juillet 2009 à l'échelle régionale en Ile de France

Afin de mieux comprendre et expliquer les forts taux d'ozone mesurés à une échelle fine, il est nécessaire d'étudier le contexte à l'échelle régionale [5], en l'occurrence les pics d'ozone du 30 juin au 2 juillet 2009.

2.1. Utilisation du réseau Airparif

Pour étudier la distribution spatiale et temporelle des concentrations d'ozone à l'échelle régionale du 30 juin au 2 juillet 2009, nous avons utilisé les mesures issues du réseau Airparif. Les taux d'ozone sont mesurés à l'échelle horaire par 27 stations de fond (urbaine, périurbaine et rurale ; fig.1) ainsi que celle dite « d'observation »,

située au troisième étage de la Tour Eiffel. Les données retenues présentent moins de 5% de lacunes. Après une analyse de la variabilité temporelle et spatiale, nous avons mis en relation ces résultats avec la vitesse et la direction du vent mesurées par 5 stations Météo France : Tour Eiffel, Paris-Montsouris, Villacoublay, Orly et Le Bourget. En outre, ce pic de pollution a été replacé et comparé avec les épisodes précédents sur une période de 11 ans (1^{er} janvier 1999 – 31 décembre 2009).

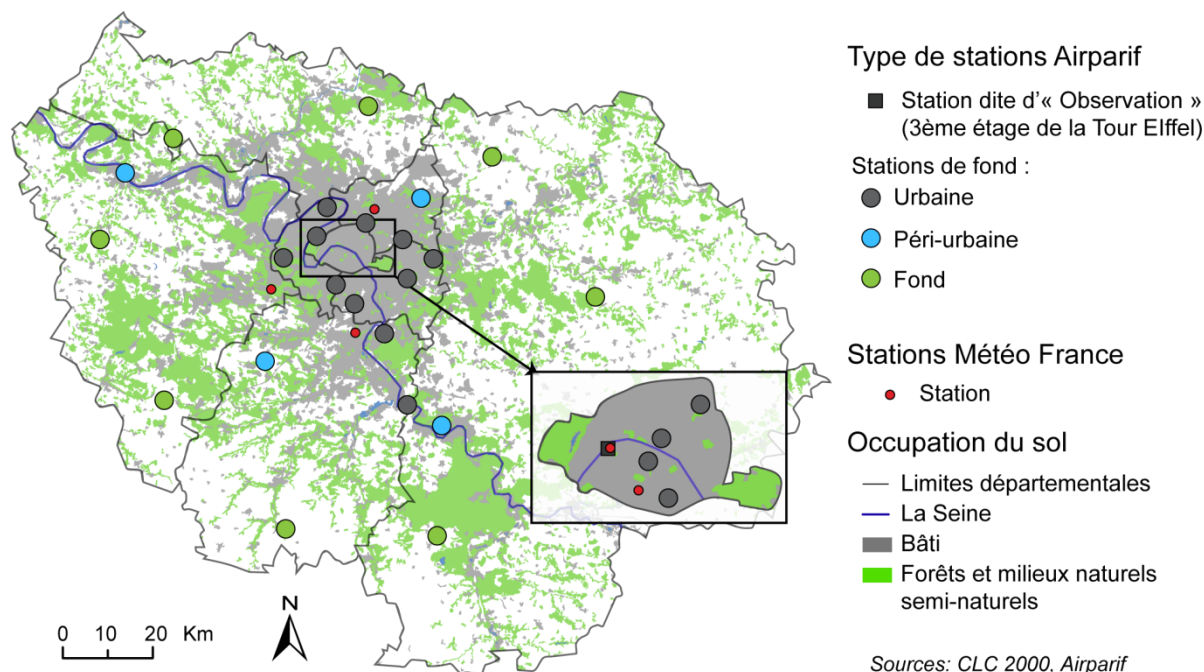


Figure 1 : Localisation des 28 stations de fond et d'observation Airparif et des 5 stations Météo France utilisées du 30 juin au 2 juillet 2009

2.2. Variabilité temporelle du pic de pollution

Du 30 juin au 2 juillet 2009, les données météorologiques observées à Paris-Montsouris et à Orly montrent des températures élevées (en moyenne de 24°C à 25°C avec des maximales supérieures à 29°C), un ciel clair (indice de nébulosité entre 0 et 2/8) et des vents faibles (inférieurs à 3 m/s). Cette situation radiative a favorisé la stagnation de l'ozone. Le 30 juin, les taux moyens journaliers avoisinent en moyenne 103,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et une station dépasse le seuil d'information et de recommandation fixé à 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Les Ulis avec un maximum de 208 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Ce seuil critique fixé au niveau national correspond à une concentration d'ozone dans l'atmosphère au-delà de laquelle une exposition de courte durée peut entraîner des effets sur la santé des personnes sensibles (enfants, personnes âgées, asthmatiques et avec insuffisances respiratoires chroniques) [6]. Le 1^{er} juillet, les concentrations moyennes journalières sont un peu plus élevées (moyenne régionale de 107,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et deux stations dépassent le seuil critique. Enfin, le dernier jour, où les concentrations d'ozone sont plus élevées en moyenne que les deux autres jours, la procédure d'alerte est déclenchée par Airparif à 16h UTC (18h locales) avec un dépassement du seuil critique par 13 stations.

L'épisode de pollution à l'ozone du 30 juin au 2 juillet n'est pas exceptionnel en intensité et en durée par rapport à d'autres épisodes (par exemple en août 2003 ou encore en juillet 2006). Par contre, à partir des données depuis juillet 2006 (avec un réseau quasi-similaire), il se démarque par son extension spatiale : un plus grand

nombre de stations a atteint le seuil critique. Notons que, ce même été 2009, de fortes concentrations d'ozone ont aussi été observées le 6 août mais le pic n'a duré qu'une journée avec des taux en moyenne plus bas que début juillet.

A une échelle temporelle plus fine, les moyennes régionales des concentrations horaires d'ozone présentent une variabilité et un cycle diurne bien marqué (fig.2) : les taux d'ozone sont plus élevés l'après-midi et relativement stables pendant quelques heures. Cet accroissement des taux d'ozone s'explique d'une part par une insolation plus forte l'après-midi favorisant la photochimie de l'ozone et, d'autre part, par la dynamique de la couche limite qui facilite le brassage de l'air dans la journée. La période de stabilité de l'ozone dans l'après-midi, appelée « niveau d'équilibre d'ozone journalier » est souvent observée et s'étend ici de 12h à 16h UTC. A l'inverse, les taux les plus faibles sont mesurés entre 4h et 7h UTC du matin : la photochimie est impossible la nuit et le brassage de l'air est quasiment nul à cause de l'affaissement de la couche limite.

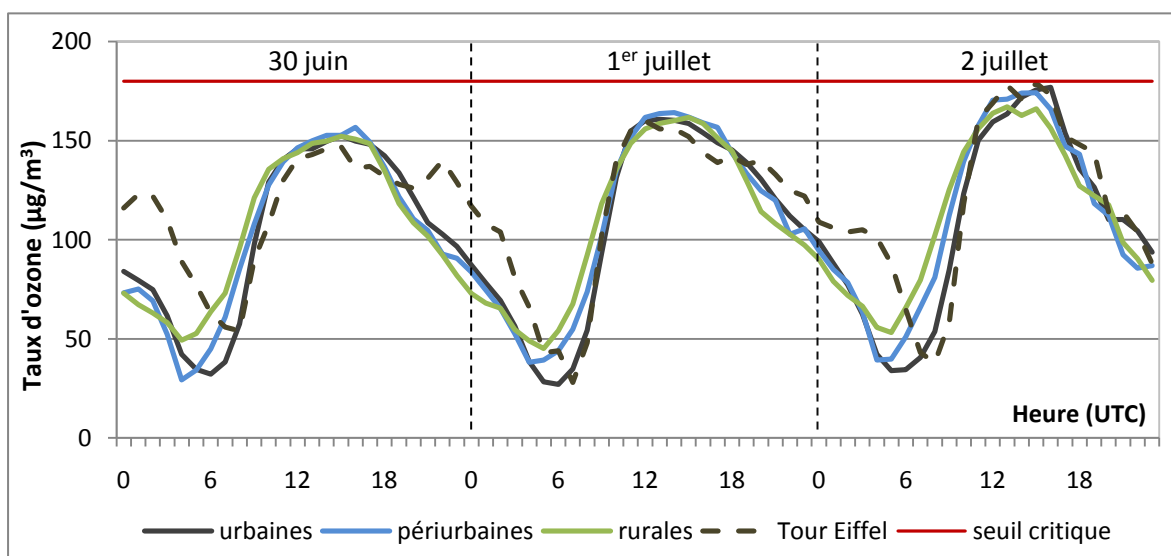


Figure 2 : Variabilité des taux horaires moyens issus de stations de fond (urbaine, périurbaine et rurale) du réseau Airparif, du 30 juin au 2 juillet 2009

Les courbes d'évolutions horaires des concentrations d'ozone montrent des évolutions similaires pour les trois types de station de fond, avec cependant une différence observée la nuit. En effet, les taux sont relativement plus élevés de 4h à 8h UTC en zone rurale que dans les zones urbaines et périurbaines, ce qui peut s'expliquer par la densité du trafic routier aux heures matinales de pointe. L'oxyde d'azote émis par la circulation routière a une réaction de titration de l'ozone qui provoque sa destruction.

Par ailleurs, les mesures de la station d'observation montrent un décalage dans la diminution des concentrations d'ozone la nuit. En fin de nuit, les concentrations y sont plus élevées que pour les stations de fond, ce qui s'explique par la situation de cette station au 3^{ème} étage de la Tour Eiffel, dans la couche intermédiaire la nuit. Lors des soirées estivales en situation anticyclonique, les touristes sont donc plus exposés lorsqu'ils montent à la Tour Eiffel que s'ils restent au sol.

2.3. Distribution spatiale des concentrations d'ozone

Afin d'étudier la variabilité spatiale des taux d'ozone à l'échelle régionale, nous avons choisi de nous focaliser sur les maxima journaliers calculés à partir des concentrations horaires d'ozone. Ils ont tous été observés entre 12h et 16h.

La carte des maxima des taux horaires pour les trois journées indique une forte variabilité spatiale (fig. 3). Ainsi, les deux premiers jours, les plus fortes valeurs sont globalement relevées du nord de Paris au sud-ouest de la région avec des maxima dans l'Essonne. Cette distribution spatiale corrobore les sorties de modèles de Airparif et peut s'expliquer par un vent faible (de 1 à 3 m/s) principalement de nord-est entraînant l'ozone vers le sud-ouest de la région.

Le 2 juillet, les maxima des taux horaires sont plus élevés et 13 stations dépassent le seuil d'information et de recommandation entre 12h et 16h UTC. De plus, la variabilité spatiale est plus forte que les jours précédents : l'écart-type de la distribution des concentrations horaires maxima est de 15,6 alors que le 30 juin, elle est de 9,8 et de 13,5 le lendemain (hiérarchie respectée avec les coefficients de variation). Le 2 juillet, la direction du vent est plus variable mais elle est de dominance sud-est de 16h à 17h UTC environ. Cette variation explique des taux élevés dans tout le centre et l'ouest de la région parisienne. Si le sujet d'étude est l'exposition des touristes à la pollution, dans cette dernière configuration régulièrement observée lors des épisodes d'ozone, les touristes sensibles sont moins exposés dans l'est de l'Île de France (Eurodisney, Fontainebleau...) que dans Paris *intramuros* ou à l'ouest (Château de Versailles).

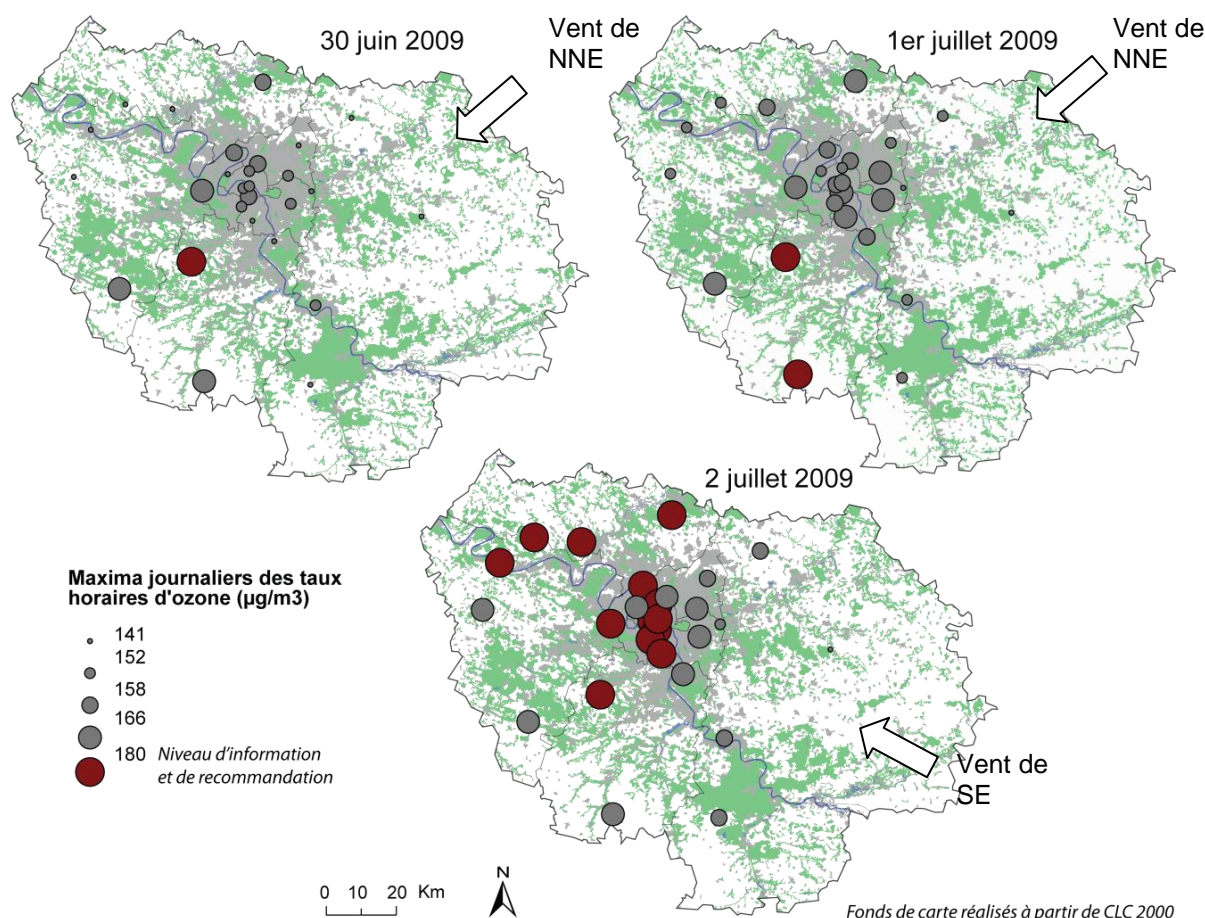


Figure 3 : Distribution spatiale des maxima journaliers d'ozone mesurés par 27 stations de fond et sens du vent dominant du 30 juin au 2 juillet 2009

3. Mesures de terrain des concentrations d'ozone à l'échelle fine sur deux transects touristiques parisiens

Des analyses des données Airparif de 1999 à 2008 (non montrées ici) ont mis en évidence des épisodes de pics de pollution à l'ozone plus fréquents en juillet et août, période durant laquelle la fréquentation touristique est la plus élevée. Dans le cadre de l'avancement du travail doctoral sur la pollution de l'air et les touristes, nous avons donc choisi de surveiller les modèles météorologiques et ceux de Airparif pendant les premières vacances estivales. La période la plus propice est arrivée rapidement : du 30 juin au 1^{er} juillet 2009. De plus, avant d'aller sur le terrain, nous avons étudié les courbes des données horaires d'ozone actualisées toutes les heures sur le site de Airparif (www.airparif.fr) afin de commencer les mesures au début du niveau d'équilibre diurne de l'ozone (fig. 2) et de nous focaliser surtout sur la variabilité spatiale.

3.1. Protocole de mesure

Les mesures d'ozone ont été réalisées les après-midis du 30 juin et du 1^{er} juillet, à l'aide d'un analyseur portable 2B Technologies Model 202 mesurant l'ozone par absorption d'UV (même méthode que pour les stations automatiques Airparif), avec un pas de temps de 10 secondes. De plus, nous disposions d'un capteur Testo mesurant des paramètres météorologiques (température, humidité et vitesse du vent). L'objectif était de caractériser la variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur des sites touristiques parisiens lors du niveau d'équilibre d'ozone journalier entre 12h et 16h UTC, voire de mettre en évidence l'influence des paramètres météorologiques.

Deux transects entre des sites très touristiques ont été retenus : Champs de Mars - Tour Eiffel – Trocadéro et Champs Elysées – Jardin des Tuileries. Ce choix a aussi été motivé par l'hétérogénéité spatiale des espaces rencontrés : surfaces enherbées ou artificialisées, proximité ou non du trafic routier, etc. Le 30 juin, nous avons mesuré sur un premier transect horizontal Champs de Mars – Tour Eiffel et sur un transect vertical (1^{er} et 2^{ème} étage de la Tour Eiffel) ; le 1^{er} juillet, sur les deux transects étudiés.

Signalons que le 30 juin, nous avons voulu mesurer en premier les concentrations d'ozone le long des quais de la Seine, rive gauche, en utilisant un Vélib' (en outre, cela nous permettait de rejoindre le site de la Tour Eiffel). Ce trajet relie plusieurs sites touristiques parisiens, de la Bibliothèque François Mitterrand à l'esplanade des Invalides en passant par Notre-Dame ou encore le musée d'Orsay (fig. 4). L'itinéraire choisi est un des axes routiers les plus empruntés à Paris. Or, l'ozone réagit rapidement au contact des oxydes d'azote émis par les véhicules et donc, à chaque passage ou arrêt de véhicule à proximité du capteur, les concentrations d'ozone diminuaient fortement. La variabilité des mesures faites durant ce trajet est tellement élevée qu'il est difficile d'interpréter les données. Nous avons donc décidé de ne pas les présenter ici.

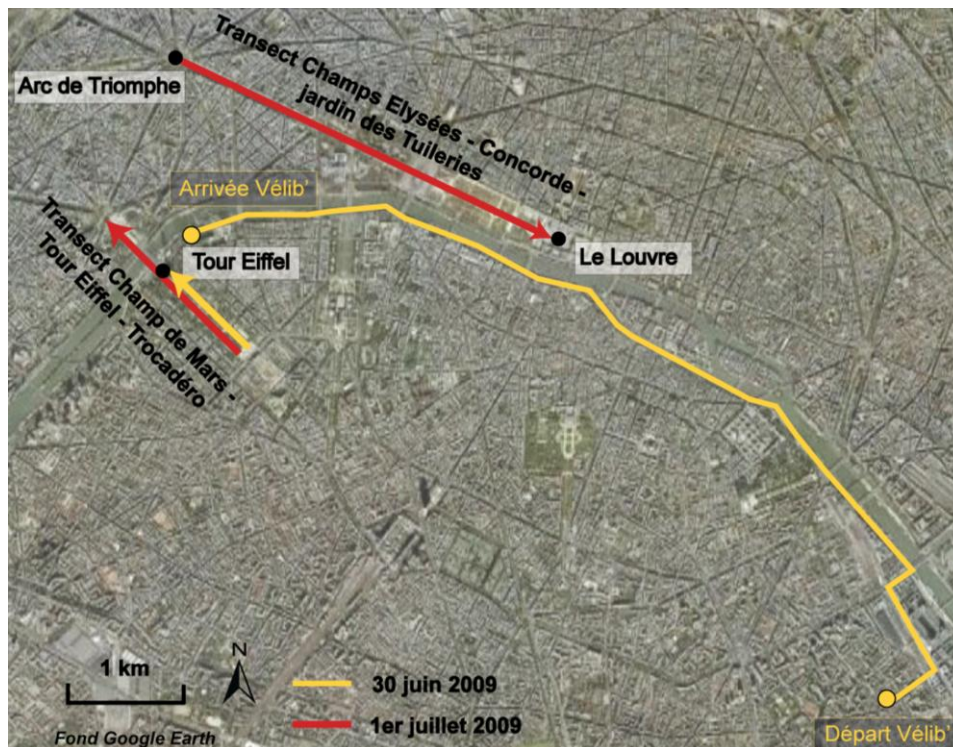


Figure 4 : Transects des mesures de terrain effectuées le 30 juin et 1^{er} juillet 2009, et itinéraire des mesures en Vélib' du 30 juin 2009

3.2. Etude de la variabilité spatiale autour de la Tour Eiffel

Les mesures des concentrations d'ozone ont été réalisées sur le site du Champ de Mars à la Tour Eiffel le 30 juin et du Champ de Mars au Trocadéro le 1^{er} juillet 2009. Les données nous ont permis d'analyser la variabilité spatiale sur ce site mais les différences de concentrations moyennes entre les deux jours et les horaires différents (entre 16h-16h30 UTC le 30 juin et 13h50-14h20 UTC le 1^{er} juillet) ne permettent pas de comparer directement la variabilité entre les deux jours. Nous préférons donc détailler les deux événements à la suite.

Le 30 juin, nous observons une variabilité spatiale relativement faible et des valeurs assez homogènes que ce soit sur le plan horizontal ou le vertical. La figure 5 est un montage pour le 30 juin entre la courbe d'évolution au pas de 10 secondes avec des repères cartographiques et la représentation des taux d'ozone relevés ponctuellement sur le transect.

A une micro-échelle, cette faible variabilité observée peut être liée à des rafales de vents ou bien à l'enherbement mais il est difficile de dégager des tendances. La température mesurée présente aussi une faible variabilité avec une moyenne élevée de 32 °C. Pour une prochaine campagne de mesures, la vitesse du vent et la température devront être mesurées à la même hauteur que le capteur d'ozone.

Ensuite, nous avons aussi souhaité savoir s'il existait une variabilité verticale des taux d'ozone. Pour cela, nous avons réalisé des mesures au 1^{er} et 2^{ème} étage de la Tour Eiffel. Ceci étant, la relation entre l'altitude et les concentrations n'est pas significative. Les moyennes observées au 1^{er} étage de la Tour Eiffel sont de 146 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 1^{er} étage, de 147 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ au 2nd étage, donc quasi-identiques. Par ailleurs, à la vue des variations entre les taux d'ozone mesurés par les stations de fond et la station d'observation la nuit, il serait intéressant de réaliser des mesures à différents étages en fin de soirée.

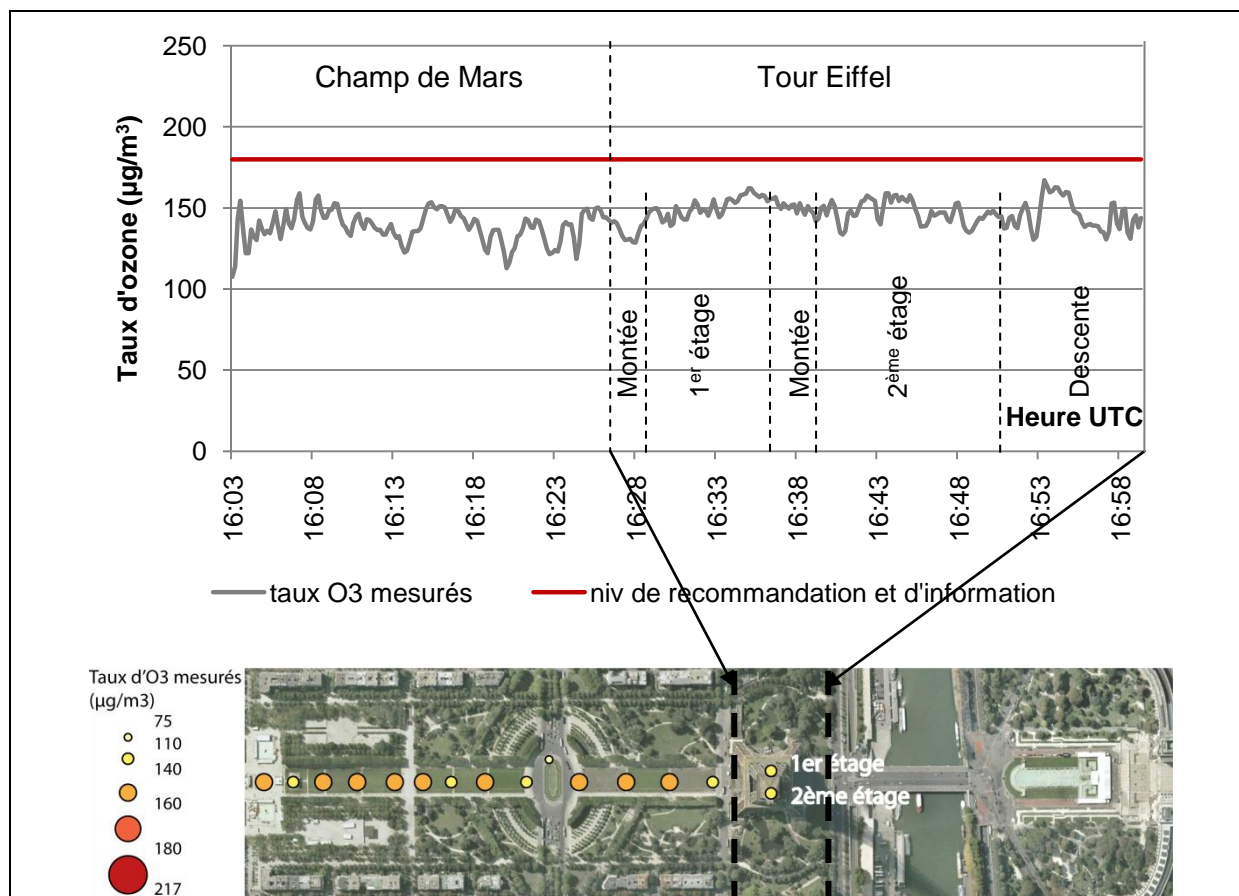


Figure 5 : Variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur le site de la Tour Eiffel, le 30 juin 2009

Le 1^{er} juillet, les taux horaires d'ozone étaient en moyenne plus élevés à Paris que le 30 juin ($101\mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne le 30 juin pour les stations de fond Airparif et $106\mu\text{g}/\text{m}^3$ le 01 juillet). Sur le terrain, nous avons aussi observé des taux plus importants le deuxième jour mais cette information est à prendre avec précaution car les mesures n'ont pas été faites à la même heure.

La variabilité spatiale observée sur le transect allant du Champ de Mars au Trocadéro de 13h50 à 15h05 est relativement importante (fig. 6). Les taux sont plus élevés sur le site du Champ de Mars, espace vert, qu'à proximité de la circulation routière et des espaces artificialisés (route, pont d'Iéna). En effet, la médiane des taux d'ozone mesurée sur le Champ de Mars est de $170\mu\text{g}/\text{m}^3$ (sans prendre en compte les taux mesurés, délibérément, à côté bus), alors que la médiane des taux d'ozone diminue à proximité de la voie de circulation des quais de Seine : elle est de $167\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur le parvis de la Tour Eiffel et de $160,4\mu\text{g}/\text{m}^3$ sur les deux axes de circulation et le pont d'Iéna. Nous notons également une forte variabilité sur le Trocadéro, espace très hétérogène, avec des taux d'ozone aussi élevés que sur le Champ de Mars et à l'inverse, des taux plus faibles se rapprochant plus des concentrations observées à proximité du trafic routier et sur les espaces artificialisés. Les températures sont aussi variables et plus élevées sur le Trocadéro et au passage de la Seine (moyenne de $33,2^\circ\text{C}$) que sur le Champ de Mars et sur le parvis de la Tour Eiffel, relativement ombragé (moyenne de $31,8^\circ\text{C}$).

A une échelle plus fine, nous observons une variabilité intra-espace, que ce soit pour les températures ou pour les taux d'ozone. Les températures sont en moyenne plus élevées au début du parcours, espace plus ouvert et avec moins de rafales de vent,

que sur le reste du Champ de Mars. De plus, les taux d'ozone sont relativement plus faibles au début avec un taux médian de $165,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ qu'au milieu et la fin du Champ de Mars avec un taux médian $172,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (sans compter le bus). Ceci peut s'expliquer par des rafales de vent (jusqu'à $4,2 \text{ m/s}$) plus fréquentes favorisant le brassage de l'air et donc la formation de l'ozone ainsi que sa concentration dans certaines zones. Sur cette zone, nous avons mesuré l'ozone à côté d'un bus touristique et les taux d'ozone ont chuté instantanément : l'oxyde d'azote détruit l'ozone. Sur le parvis de la Tour Eiffel, les taux d'ozone diminuent à proximité du trafic routier. La variabilité au passage de la Seine s'explique également par le passage de véhicules à proximité et des faibles brises ramenant des taux d'oxyde d'azote. Sur le Trocadéro, espace très hétérogène, la proximité d'espace enherbé ou de zones artificialisées et de machines de construction explique la forte variabilité sur cet espace.

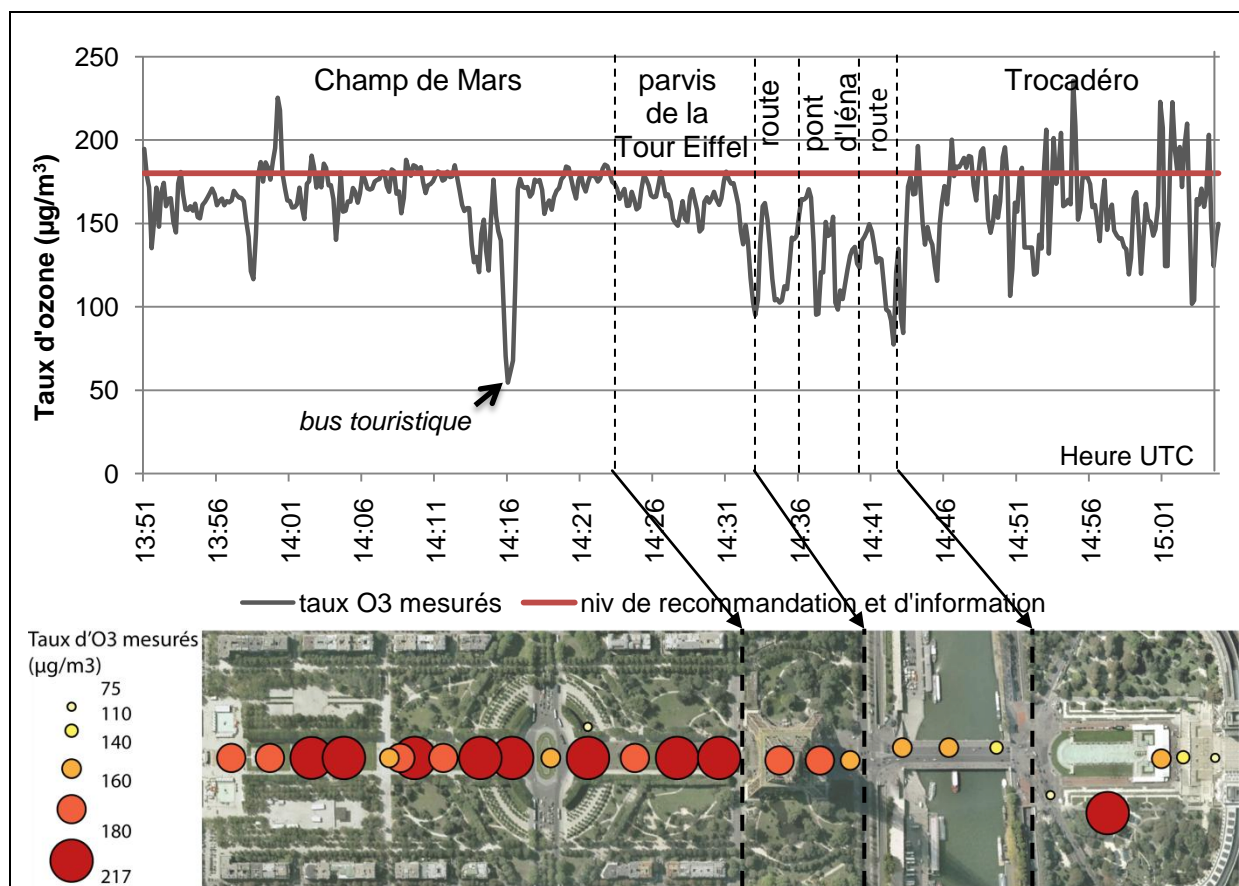


Figure 6 : Variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur le site de la Tour Eiffel, le 1^{er} juillet 2009

3.3. Etude de la variabilité spatiale sur le site allant des Champs Elysées au jardin des Tuileries

Les taux d'ozone relevés sont relativement plus faibles sur ce deuxième transect que sur le premier réalisé le même jour. Cependant, ils n'ont pas été mesurés en même temps et selon les moyennes horaires des stations de fond à Paris, les taux ont commencé à diminuer à partir de 16h.

La figure 7 nous indique deux phases : les taux d'ozone sont en moyenne plus élevés sur l'avenue des Champs Elysées et la place de la Concorde que dans le jardin des Tuileries (respectivement $141 \mu\text{g}/\text{m}^3$ et $165 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Comme

précédemment, nous remarquons que les espaces à proximité du trafic routier présentent des taux plus faibles d'ozone. Sur les Champs Elysées, nous avons aussi pu observer que les concentrations étaient en moyenne plus élevées lors de croisements entre deux rues. De plus, dans le jardin des Tuileries, les taux sont plus faibles à la fin du transect, avec le passage au dessus d'un tunnel assez fréquenté et 250 m plus loin, au niveau de la rue devant la pyramide du Louvre.

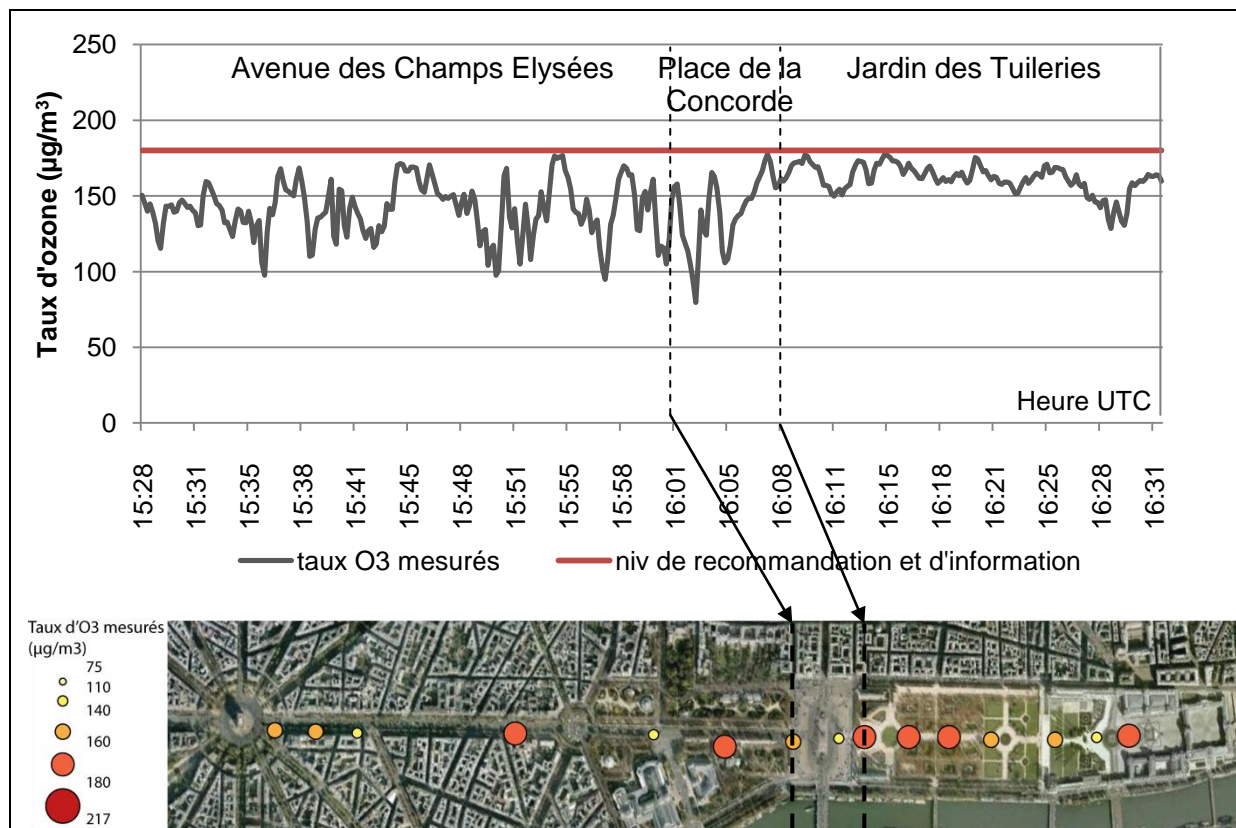


Figure 7 : Variabilité spatiale des concentrations d'ozone sur le site Champs Elysées - Tuileries, le 1^{er} juillet 2009

4. Conclusion et perspectives

Du 30 juin au 2 juillet 2009, les concentrations horaires d'ozone étaient élevées en région parisienne et plus précisément dans le centre et l'est, dépassant pour quelques stations le seuil critique de $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (normes françaises). Une variabilité temporelle avec un cycle bien marqué et des taux plus élevés le dernier jour ont été observés. De plus, nous avons montré l'influence du vent sur les configurations spatiales des concentrations.

A échelle fine, les mesures de terrain ont mis en évidence une variabilité spatiale à échelle fine fortement liée à la proximité du trafic routier et du type de surface : les taux sont plus faibles à proximité de la circulation routière que dans les espaces verts. Selon cette étude, en cas de pic de pollution, il serait préférable pour la population et les touristes sensibles, de rester plus à proximité des voies de circulation routière...

Ces mesures seront étendues l'été prochain à d'autres sites touristiques. D'ici là, une campagne de mesure hivernale des concentrations de particules va être lancée. Enfin, la perception des touristes sur la qualité de l'air sera évaluée à partir d'enquêtes.

Bibliographie

- [1] Airparif, Canicule et pollution par l'ozone : l'été de tous les records, *Airparif Actualité* 2003, 5 p.
- [2] Airparif, *La qualité de l'air en Ile de France en 2008*, Rapport d'activité, 91 p.
- [3] Burley J.D., Ray J.D., Surface ozone in Yosemite National Park, *Atmospheric Environment* 2007; 41 : 6048–6062.
- [4] Camalier L., Cox W., Dolwick P., The effects of meteorology on ozone in urban areas and their use in assessing ozone trends, *Atmospheric Environment* 2007; 41 : 7127–7137.
- [5] Martin N., Carrega P., La variabilité spatiale de l'ozone en milieu urbain et périurbain : le cas de Nice, *Pollution Atmosphérique* 2009 ; 204 : 461–474.
- [6] Weber F. et al., Ozone troposphérique et santé, *EXTRAPOL* 2008, 36, 44 p.